

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování



## *Přípravek k vyvažování*

## *The Preparation for the Calibration*

Student: Lukáš Macháček  
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Blata

Ostrava 2009

**Poděkování:**

Děkuji panu Ing. Aleši Rodemu za přednesené informace k dané problematice, za poskytnutí firemních materiálů zabývajících se touto problematikou a pomoci při měření.

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

**Prohlašuji, že:**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB–TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě .....

.....  
podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Lukáš Macháček

Chaloupky 200

696 66 SUDOMĚŘICE NAD MORAVOU

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MACHÁČEK, L. *Přípravek k vyvažování*. Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 43s. Bakalářská práce, vedoucí: Ing. Jan Blata.

Bakalářská práce se zabývá problematikou provozního vyvažování rotačních součástí. V úvodu jsou zde popsány prvotní příčiny nevývahy, vlastnosti a následné účinky. Další část je věnována detekci nevyváženosti za pomoci moderních přístrojů k měření.

Vzhledem k rozsahu dané problematiky a důsledkům, které mají negativní vliv na provozní vlastnosti stroje, byl navrhnut přípravek k vyvažování, jenž slouží k demonstraci této problematiky. Na daném přípravku byla provedena názorná měření v různých způsobech nastavení a vyzkoušena vhodnost některých vyvažovacích metod.

## ANNOTATION OF THESIS

MACHÁČEK, L. *The Preparation for the Calibration*. Ostrava: Department of Production Machinery and Constuction, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 43p. Thesis, head: Ing. Jan Blata

Bachelor's thesis deals with the operating balancing of rotating parts. In the introduction, there are described the primary causes of imbalances, properties and effects. Another part is devoted to the detection of imbalances with the help of modern equipment to measure. Given the scale of the problem and the consequences of which have a negative impact on the operational characteristics of the machine was designed for balancing product, which serves to demonstrate this issue. On the object of measurement was carried out in different ways to set and tested the suitability of certain methods of balancing.

**OBSAH BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

<b>Seznam použitých symbolů a zkratk.....</b>	<b>7</b>
<b>1. Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Obecné poznatky nevývahy .....</b>	<b>9</b>
2.1 Základní pojmy [1] .....	9
2.2 Příčiny nevývahy .....	9
2.3 Účinky nevývahy .....	10
2.4 Význam vyvažování .....	10
2.5 Druhy nevyváženosti .....	10
<b>3. Diagnostika závad nevývahy a její projevy .....</b>	<b>13</b>
3.1 Vibrodiagnostika .....	13
3.2 Projevy nevývahy v FFT .....	15
3.3 Měření fáze .....	17
3.4 Přístroje k detekování nevyváženosti .....	17
<b>4. Metody provozního vyvažování.....</b>	<b>20</b>
4.1 Vyvažování v jedné rovině .....	21
4.2 Vyvažování ve dvou rovinách .....	25
<b>5. Návrh přípravku k vyvažování .....</b>	<b>27</b>
5.1 Stanovené požadavky na provoz přípravku .....	27
5.2 Použité komponenty .....	27
5.3 Možnosti přípravku k vyvažování .....	28
<b>6. Vzorová měření na přípravku .....</b>	<b>31</b>
6.1 Schéma zkušebního přípravku .....	31
6.2 Naměřené hodnoty před vyvažováním .....	32
6.2.1 Použité přístroje .....	32
6.2.2 Vyhodnocování vibrací dle ISO ČSN 10816 .....	33
6.2.3 Naměřené hodnoty vibrací.....	34
6.3 Vyvažování metodou putujícího nevyvážku .....	35
6.4 Vyvažování třibodovou (tříkružnicovou) metodou .....	37
6.5 Vyvažování vektorovou metodou.....	38
6.5.1 Kaskáda spekter a FFT spektrum vibrací po vyvážení.....	39
<b>7. Závěrečné shrnutí a doporučení.....</b>	<b>41</b>
<b>8. Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>42</b>
<b>9. Seznam příloh .....</b>	<b>43</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam
$F$	[N]	Působící síla nevyváženosti
$\omega$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
$f$	[Hz]	Frekvence
FFT		Rychlá Fourierova transformace
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Tíhové zrychlení
$m_n$	[g]	Hmotnost nevyvážku
$r_v$	[mm]	Vzdálenost nevyvážku od osy rotace
$m_k$	[g]	Korekční závaží
$m_z$	[g]	Zkušební závaží
$O$	[mm]	Velikost vektoru původní nevývahy
$T$	[mm]	Velikost vektoru spojnice konců naměřených vektorů
$\beta$	[°]	Úhel mezi vektory $O$ a $T$
$m_w$	[g]	Pomocné závaží
$X_v$	[-]	Hodnota amplitudy změřená při prvním běhu
$M$	[kg]	Hmotnost rotujících částí
$r_w$	[mm]	Pol. pomocného vyvážku udávajícího vzdálenost jeho těžiště od osy rotace
$\alpha$	[-]	Příčinkový činitel
$A$	[-]	Ložisko A
$B$	[-]	Ložisko B
$U$	[V]	Napětí
$P$	[kW]	výkon
$n$	[ot/min]	Otáčky el. motoru
$v_{ef}$	[mm/s]	Celková hodnota efektivní rychlosti
$\varphi_0$	[°]	Fázový úhel
$v_0$	[mm/s]	Amplituda na první otáčkové frekvenci, nultý chod
$v_1$	[mm/s]	Amplituda na první otáčkové frekvenci, zkušební chod
$\varphi_1$	[°]	Fázový úhel zkušební chodu

## 1. Úvod

Nevývaha je jedním s nejčastěji diagnostikovaných problému u rotačních strojů a má za následek většinu poruch, odstávek zařízení a v neposlední řadě snížení životnosti. S nevyváhou souvisí spousta negativních vlivů, které zapříčiňují provozní nespolehlivost strojních zařízení. Z tohoto důvodu se touto problematikou zabývá technická diagnostika, která se snaží tyto problémy indikovat a řešit je.

Z výše zmíněného je patrné, že prvotním úkonem je nevyváze předcházet. Pokud se nepodaří předejít nevyváze u rotačních zařízení je druhotný úkon diagnostika dané závady, ujistění zda se jedná o nevyváhu, určení jejího druhu, velikosti a dalších potřebných parametrů. Po určených diagnostických parametrech následuje samotné vyvážení.

Jelikož nelze předem stanovit zcela přesné vyvažovací postupy pro jakoukoliv rotační součást, budu se ve své bakalářské práci zabývat návrhem zkušebního přípravku, kdy bude provedena demonstrace účinků, diagnostika nevyváhy a její následné odstranění některými z uvedených metod.



**Obr.1.1** Energeticky účinná ložiska SKF [2]

Při problému spojeného s nevyváhou není zajištěn klidný chod strojního zařízení. Zajištění klidného chodu je velmi důležité a to z mnoha důvodů:

- z hlediska fyziologického působí na obsluhu daleko lépe stroj, který pracuje bez vibrací a hluku
- z hlediska technického přispívá klidný chod k zajištění dlouhodobého bezporuchového provozu a u výrobních strojů má podstatný vliv na kvalitu výrobků
- z hlediska hospodářského se prodlužuje životnost stroje a zkracuje doba prostojů na nutné opravy



## 2. Obecné poznatky nevývahy

### 2.1 Základní pojmy [1]

- **Centrální hlavní osa setrvačnosti** – osa tělesa procházející těžištěm k níž hmotnostní momenty setrvačnosti nabývají extrémních hodnot a deviační momenty jsou rovny nule.
- **Osa rotace** – geometrické místo bodů otáčejícího se tělesa, které mají nulovou obvodovou rychlost.
- **Tuhý rotor** – rotor, který se za rotace nedeformuje působením odstředivých sil nevývažků. Lze jej vyvažovat ve dvou libovolně zvolených rovinách.
- **Pružný rotor** – rotor, který není tuhý. Lze jej vyvažovat ve více než dvou rovinách.
- **Nevyváženost** – stav kdy centrální hlavní osa setrvačnosti není totožná s osou rotace.
- **Vyvažovací rovina** – rovina kolmá k ose rotoru, ve kterém se přidává, ubírá nebo přemísťuje korekční hmota.
- **Měřicí rovina** – rovina kolmá k ose rotoru, ve které se získávají informace o nevyváženosti rotoru.
- **Provozní vyvažování** – vyvažování rotoru ve vlastním rámu, vlastních ložiskách, při provozních otáčkách a za provozních podmínek. Měří se odezva vibrace na odstředivé síly (výchylka, rychlost nebo zrychlení).

### 2.2 Příčiny nevývahy

Prvotní možnou příčinou nevývahy jsou výrobní a montážní nevyváženosti, např.:

- nerovnoměrná hustota materiálu součástí,
- výrobní úchytky a výstřednosti rotačních ploch vůči ose rotace,
- trvalá deformace součástí,
- nekruhovitost ložiskových čepů, popřípadě jejich ohnutí,
- neobrobené plochy.

Mezi další možné příčiny se řadí funkční nevyváženosti, např.:

- vzájemné uvolnění části rotoru s možnou deformací,

- nerovnoměrné opotřebení rotoru (čerpadlo – nestejně opotřebené oběžných kol),
- kinetické příčiny nevyváženosti
- z funkce stroje např. odstředivky.

## **2.3 Účinky nevývahy**

Projevem nevývahy jsou budící síly, které se projevují vibracemi a hlukem. Nevyváženost obvykle způsobuje větší dynamické zatížení ložisek, což způsobuje jejich kratší životnost a závady. Zvyšuje dynamické namáhání rotoru, může způsobit kolizi statoru s rotorem a případnou havárii stroje – ohrožení funkce stroje a způsobení provozní nespolehlivosti.

## **2.4 Význam vyvažování**

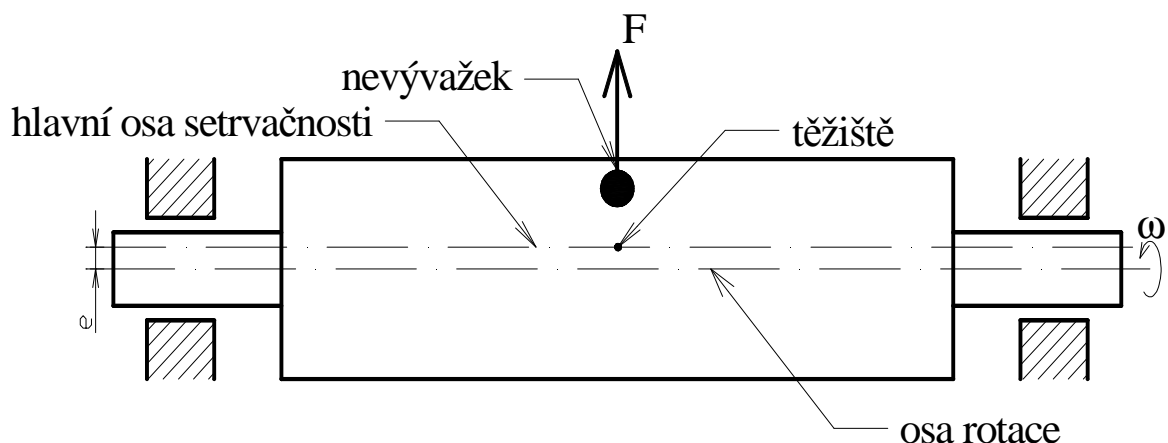
Vyvažování znamená přiblížit osu těžiště k ose rotace co nejpresněji, zlepšit rozložení hmoty rotujícího tělesa natolik, aby se toto dané těleso otáčelo ve svém uložení bez působení volných odstředivých sil, a aby jeho ložiska nebyla namáhána periodickými silami s frekvencí otáček.

## **2.5 Druhy nevyváženosti**

### **Statická nevyváženost**

Těleso se nachází v statické nevyváženosti tehdy, jestliže jeho hlavní osa momentu setrvačnosti je rovnoběžná s osou rotace. Tento případ je naznačen na obr.2.2. U statické nevyváženosti působí pouze jedna síla. Při statickém vyvažování se snažíme vhodným způsobem posunout těžiště zpět do osy rotace, k čemuž stačí přidání nebo ubrání hmoty v jedné vyvažovací rovině.

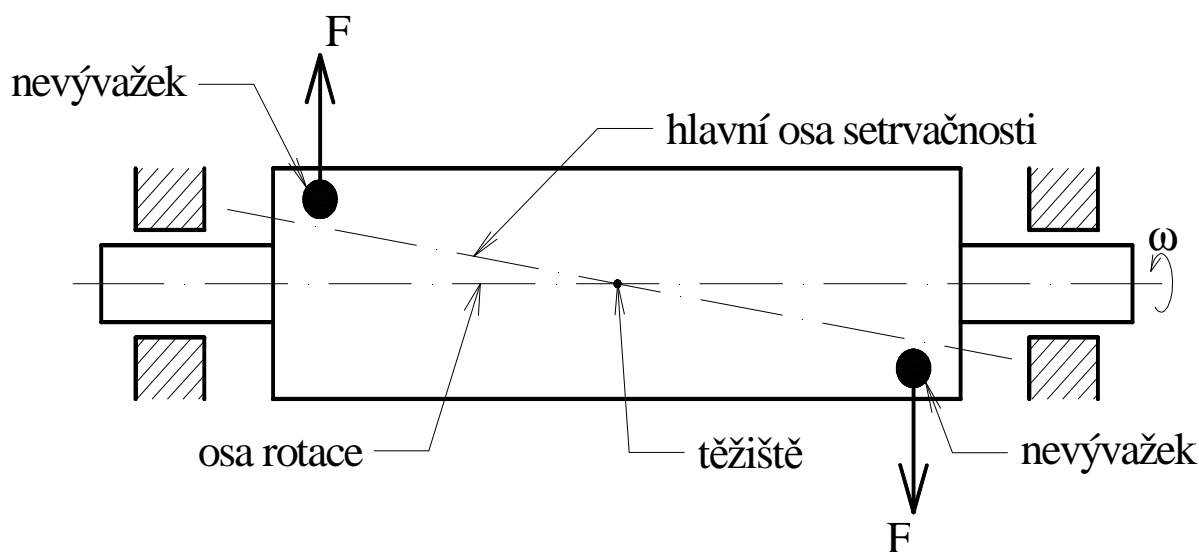
Statickou nevyváženost je možné pozorovat, položíme-li rotor na plochu s co nejmenším třením. Rotor se otočí tak, že nejtěžší bod zaujme nejnížší polohu.

**Obr.2.2** Staticky nevyvážený rotor

### Momentová nevyváženost

Hlavní osa setrvačnosti svírá s osou rotace určitý úhel a protíná ji v ose těžiště rotoru. Na rozdíl od statické nevyváženosti nelze momentovou nevyváženost měřit v klidovém stavu. U momentové nevyváženosti působí dvě totožné síly proti sobě tj.  $180^\circ$ , což způsobuje, že v klidové poloze se její rotor jako vyvážený. Přesto při otáčení rotoru posunují tyto síly rotor na obou koncích hřídele v opačném směru. Důsledkem toho rotor vibruje a naměřené hodnoty fáze na protějších koncích hřídele jsou posunuty o  $180^\circ$ . Jak tato nevyváženost vznikne je znázorněno na obr.2.3.

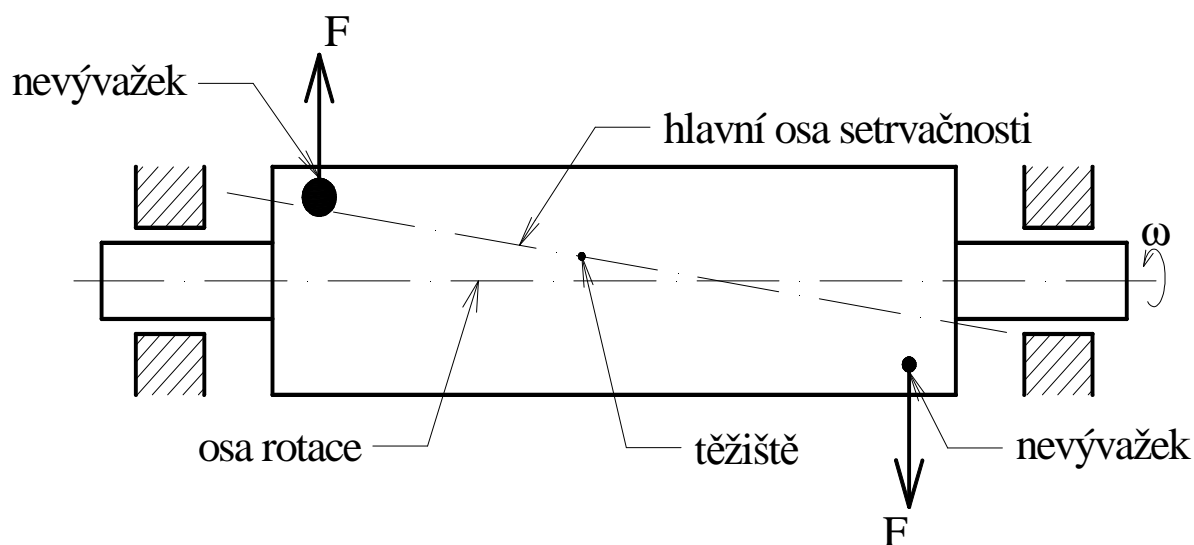
Čistě momentová nevyváženost se odstraní odebráním nebo připojením dvou stejně velkých hmot ve dvou vyvažovacích rovinách, které vyvolají stejně velkou, ale v opačném smyslu účinkující dvojici odstředivých sil.

**Obr.2.3** Momentově nevyvážený rotor

**Dynamická (obecná) nevyváženost**

Rotor je dynamicky nevyvážen tehdy, je-li hlavní osa setrvačnosti mimoběžná s osou rotace. Nevyváženost tohoto typu je možno považovat za složenou z nevyváženosti čistě statické a momentové a je v praxi nejčastější. Znázornění dynamické nevyváženosti je na obr.2.4.

Při vyvažování stroje se vyvažuje nejdříve statická nevyváženost a pak teprve nevyváženost momentová. Toto vyvažování se musí provádět v několika rovinách.



**Obr.2.4** Dynamická (obecná) nevyváženost

### 3. Diagnostika závad nevývahy a její projevy

K diagnostice problému spojeného s nevývahou je nutné použít měření celkových vibrací frekvenčního spektra viz.3.1 a měření fáze viz.3.3.

#### 3.1 Vibrodiagnostika

##### Vibrace

Vibrace jsou projevem chování mechanických částí stroje, kterými reagují na působení vnitřních a vnějších sil. Většina závad rotačních strojů se projevuje vibracemi, proto používáme vibrační signály jako indikátory mechanického stavu strojů.

Každý druh závady generuje určitý druh vibrací, dle kterých lze zjistit danou závadu tj. nevývahu, nesouosost, vůle pohyblivých součástí atd.

Základní parametry vibrací:

- Frekvence (kmitočet) [Hz] – udává četnost jistého jevu v daném časovém úseku. Dle frekvence vibrací lze usuzovat na druh závady.
- Amplituda – velikost vibračního signálu. Souvisí se závažností závady. Větší amplituda znamená větší závadu. (dráhy, rychlosti, zrychlení).

##### Druhy snímačů ke snímání vibrací

Vibrace vyskytující se v praxi jsou s velmi nízkými amplitudami výchylky. Ustálená vibrace je charakterizována výchylkou, zrychlením a rychlostí v amplitudě a frekvencí a fází z časového pohledu. Tyto veličiny jsou spolu matematicky svázány ale jedná se o zcela odlišné charakteristiky. Proto je potřeba zvolit k měření vibrací vhodný typ snímače a způsob měření. Snímače vycházejí z principu měření.

Druhy snímačů:

- Snímače výchylky – měří se v mikrometrech (případně mils). Výchylka představuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. Nevýhodou jsou velké rozměry, hmotnost a omezené frekvenční pásmo.
- Snímače rychlosti – měří se v mm/s nebo in/s, jako rychlost změny výchylky vibračního signálu. Nejběžnější způsob měření vibrací.

Nevýhoda je nepřesnost při nízkých frekvencích do 10 Hz a podobně je tomu u vyšších kmitočtů nad 2kHz.

- Snímače zrychlení – měří se v  $\text{m/s}^2$  nebo  $\text{in/s}^2$ . Zrychlení představuje rychlost změny rychlosti. Princip je založený na piezoelektrických krystalech. Mají vysoký rozsah měření až do 400kHz. Protože nejčastěji měřenou charakteristikou při monitorování vibrací je rychlost, jsou hodnoty zrychlení integrovány. Jsou nejjednodušší, nejpřesnější, nejlehčí.



**Obr.3.5** Ukázka snímačů zrychlení firmy SKF a.s. [10]

Vlastní upevnění snímačů vibrací se dnes provádí pomocí – šroubu, vosku, lepidla, magnetu nebo je použito ruční sondy.

### **Celkové vibrace**

Celkové vibrace představují celkovou vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu. Měření celkových vibrací stroje nebo části a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní získáme informaci o stavu stroje. Zjistíme-li vyšší než normální úroveň celkových vibrací, pak existuje nějaká možná příčina těchto vyšších hodnot.

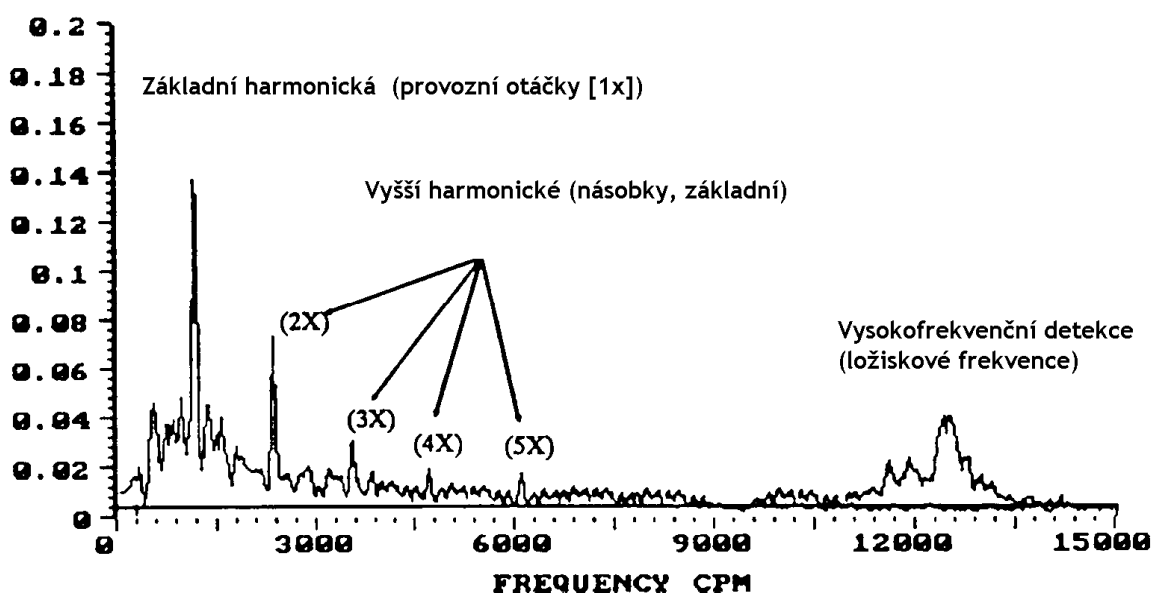
Dané naměřené hodnoty jsou uváděny buď v frekvenčním spektru nebo časovém záznamu.

### Frekvenční analýza pomocí FFT

Nejčastější a nejvhodnější metodou pro sledování vibračních signálů způsobem vhodným pro jejich analýzu z frekvenčního spektra je pomocí FFT – Fast Fourier Transformation. (rychlá Fourierova transformace). V nematematickém vyjádření to znamená, že vibrační signál je rozložený na určité amplitudy odpovídající různým frekvenčním složkám. Vyjádřeno v souladu s předchozí otázkou, tak pomocí FFT vyhodnocujeme celkové vibrace, čímž zajistíme celkovou mohutnost kmitání na dané frekvenční složce. [3]

FFT umožňuje analyzovat vibrační amplitudy různých složek frekvenčního spektra. Možnost sledovat vibrace, které se vyskytují při určitých frekvencích.

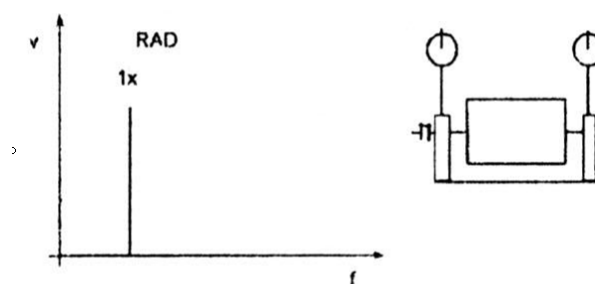
K vlastní diagnostice závad se využívá celého frekvenčního spektra, tzn. vyšších harmonických, subharmonických, vysokofrekvenční defekce (High Frequency Detection), které nás upozorňují na závadu ložiska obr.3.6. Poté lze zjistit např.: nesouosost, *nevyváženost*, mechanické uvolnění, ohnutý hřídel.



Obr.3.6 Frekvenční spektrum [6]

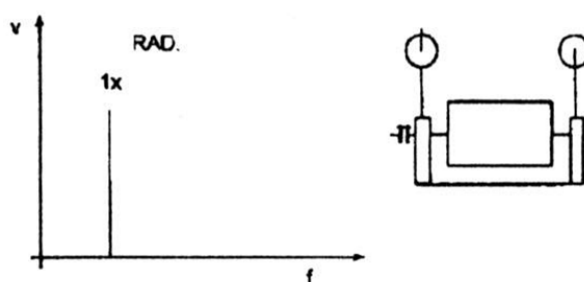
### 3.2 Projevy nevyváhy v FFT

**Statická nevyváženost** - statická nevyváha (silová) je ve fázi a je stacionární. Amplituda, která je důsledkem nevyváhy se zvětšuje s kvadrátem otáček (3x větší otáčky – 9x větší vibrace). První harmonická složka otáček je vždy přítomna a obvykle dominuje ve spektru. Měřením amplitudy vibrací na ložiskových domcích můžeme přímo zjistit velikost nevyváženosti.[1] Viz.obr.3.7.



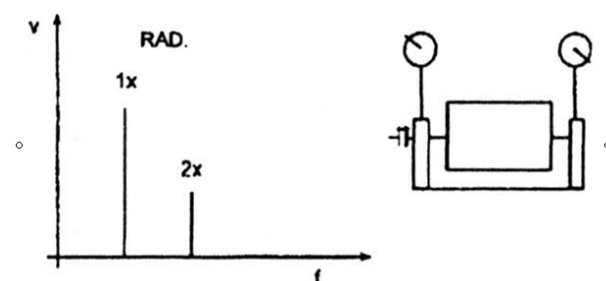
**Obr.3.7.** Projev statické nevyváženosti ve frekvenčním spektru [1]

**Momentová nevyváženost** - momentová nevyváha (dvojicová) má tendenci k posunu fáze o  $180^\circ$  na stejném hřídeli. První harmonická je vždy přítomna a obvykle dominuje ve spektru. Amplituda se mění s kvadrátem otáček. Může způsobit velké radiální a axiální vibrace. Zjištění je opětovně možné měření vibrací na ložiskových domcích. [1] Viz.obr.3.8.



**Obr.3.8.** Projev momentové nevyváženosti ve frekvenčním spektru [1]

**Dynamická nevyváženost** - centrální osa setrvačnosti a osa rotoru jsou mimoběžné. Dominuje amplituda otáčkové frekvence rotoru. Fázový rozdíl je obecný. Velká nevyváženost může způsobit nelinearitu a výskyt amplitudy s  $2x$  frekvencí otáčkovou a opět měříme na ložiskových domcích. [1] Viz.obr.3.9.



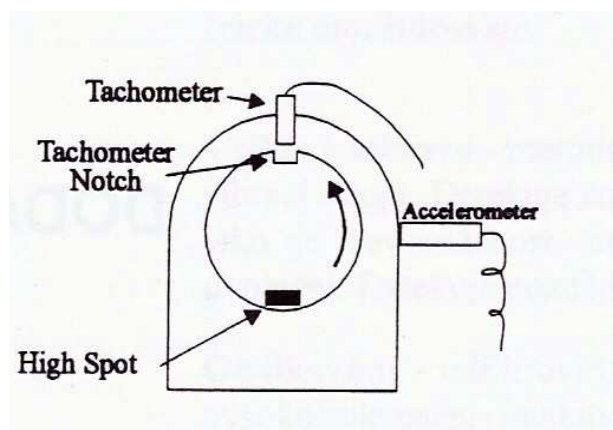
**Obr.3.9.** Projev dynamické nevyváženosti ve frekvenčním spektru [1]



### 3.3 Měření fáze

Měření fáze není analýzou vibrací, ale druhem měřením doplňující tuto analýzu. Měřením fáze se určuje úhlový posun (ve stupních) mezi signálem od referenční značky umístěné na rotující hřídeli a vibračním signálem.

Otáčkoměr generuje jeden puls ve chvíli, kdy značka míjí místo, kde je umístěn otáčkoměr. Tímto pulsem se spouští sbírání dat viz. obr.3.10.



Obr.3.10 Měření fáze [6]

Popis obr. : Tachometer – otáčkoměr, Tachometer Notch – značka pro otáčkoměr, Accelerometer – akcelerometr, High Spot – těžké místo

### 3.4 Přístroje k detekování nevyváženosti

Jak již bylo zmíněno k detekování nevyváženosti se musí použít měření celkových vibrací a měření fáze. Jako nejjednodušší a nejméně nákladné se jeví použití vibračních per – u firmy SKF a.s. VibPen. Nejlépe k této detekci poslouží přístroje se zobrazením FFT spektra a s případným vestavěným programem pro vyvažování – u firmy SKF a.s. Microlog. Nedílnou součástí k přesnému určení dané polohy nevyvážku je měření fáze – u firmy SKF a.s. Remote Laser Phase.

#### VibPen – vibrační pero

Vibrační pero je multiparametrický přístroj pro měření vibrací. Při měření s vibračním perem vstupní signál postupuje přes snímač přístroje na další zpracování a poskytuje dvě rozdílné měření, sumární hodnotu vibrací a obálku zrychlení pro každý měřicí bod na měřeném stroji. Zobrazení naměřené hodnoty je na LCD displeji. Pro

detekci nevyváženosti je důležitá hodnota sumární neboli celková hodnota vibrací. Ukázka vibračního pera na obr.3.11. Parametry vibračního pera VibPen:

- měřicí rozsah 1 - 55mm/s
- frekvenční rozsah pro sumární kmitání 10Hz - 1kHz, pro obálku zrychlení 10 – 30kHz



**Obr.3.11** Vibrační pero firmy SKF a.s. - VibPen [7]

### **Microlog – přenosný sběrač dat, FFT analyzátor**

Firma SKF a.s. nabízí různé typy přenosných Micrologů od nejzákladnějších až po typy s mnoha přídatnými možnostmi. Jakož jsou vestavěné aplikace pro vyvažování, dovyvažování aj.

Zdrojem signálu pro Microlog může být zrychlení, rychlost a výchylka z ručních nebo nainstalovaných snímačů viz.3.1, případně z monitorovacího systému. Dále možnost připojení otáčkoměru k měření fáze.

Microlog obecně nabízí možnost širokého rozsahu měření od 0,5Hz do 20kHz, průměrování, výběr filtrů, přímé zobrazení na displeji naměřeného FFT spektra, amplitudy v čase. Ukázka Micrologu CMVA 60 na obr.6.8.



Obr.3.12 Microlog CVMA 60 [8]

### Sada pro měření fáze

Sada určená k měření fáze není samostatně funkční celek, musí být doplněna o analyzátor Microlog, kde dochází k propojení kabel. Přístroj snímá jeden puls za otáčku. Přístroj umožňuje přesné získání fáze. Obr. 3.13 vyobrazuje optickou sadu pro měření fáze.

Složení přístroje:

- dálkový optický (laser) senzor
- interface modul
- on-off přepínač
- BNC konektory a části pro nabíjení



Obr.3.13 Optická sada pro měření fáze [9]

## 4. Metody provozního vyvažování

K možnosti vyvážení rotujících součástí je kromě měření vibrací nutné také měření fáze. Vyvažovací metody jsou založeny na těchto dvou naměřených hodnotách. Existuje jedna vyvažovací metoda pro vyvažování v jedné rovině, která nepotřebuje měření fáze – tzv. tříbodová metoda.

Staticky vyvažujeme obvykle jen takové součásti, které mají tvar disku. Tzv. mají malou axiální délku a pracují při nízkých provozních otáčkách. Statické vyvažování válcových těles nevede většinou k dostatečně uspokojivým výsledkům, protože v těchto případech mají důležitý význam – otáčky, rozměry tělesa, váha, způsob uložení atd.

Statické vyvažování nemůže odstranit účinky momentové nevyváhy, pokud nenastane jeden z možných případů kdy poměr délky tělesa  $l$  a průměru vyvažované součásti  $D$  je menší jak 0,2. Další možný případ, součásti s poměrem  $l/D > 1,5$  a nízkými hodnotami otáček tj. 200-300 ot/min.

Na rozdíl od statické nevyváženosti se účinek momentové nevyváženosti projeví pouze během otáčení. Její měření je proto také možné pouze na rotujícím tělese, nikoli však pomocí odvalování.

Dynamické účinky nevyvážených hmot jsou vyvolány jejich odstředivými silami, které jsou úměrné součinu hmot a jejich vzdálenosti od osy rotace. Velikost nevyvážku je definována součinem:

$$D_n = g \cdot m_n \cdot r_v \quad [\text{kg.m}] \quad (1)$$

$g$  – tíhové zrychlení

$m_n$  – hmotnost nevyvážku

$r_v$  – vzdálenost nevyvážku od osy rotace

Nevyvážek je také určen úhlovou polohou vzhledem ke zvolené referenční rovině pevně spjaté s vyvažovaným rotorem, lze jej vyjádřit jako vektor, tj. veličinou danou směrem a velikostí.

Při dynamickém vyvažování počítáme tedy s vektory nevyvážků popřípadě vývážků a s vektory kmitů, které tyto nevyvážky vyvolají např. na ložiskových domcích.

V současné době se využívají vyvažovací programy, které eliminují nutnost manuálního zpracování diagramu. Výhodou použití těchto programů je, že vyžadují co

nejmenší počet rozjezdů a zastavení stroje pro sběr vibračních dat. Redukuje se tím výrazně čas nezbytný pro vyvažování.

## 4.1 Vyvažování v jedné rovině

### Vektorová metoda

Při vyvažování v jedné rovině je nejprve zjištěna amplituda a fáze (za provozu stroje) otáčkové složky vibrací na jednom ložisku v jednom směru. Vektorově se tyto hodnoty vynesou - délka vektoru reprezentující vibrace je vynesena v zadaném poměru. Poté následuje umístění zkušebního závaží – jeho velikost je buď určena analyzátozem tj. vestavěný program, nebo se volí s ohledem na otáčky a hmotnost rotoru (pravidlem je, aby odstředivá síla od zkušebního závaží nepřekročila 10% statického zatížení podpěrných ložisek).

*Po přidání zkušebního závaží mohou nastat tyto případy:*

- Pouze náhodou může být závaží přidáno do těžkého místa rotoru, čím se nevyvaha zhorší. To způsobí zvýšení vibrací, ale fázový úhel se nezmění
- Rovněž náhodou může být závaží přidáno naproti těžkému místu rotoru. Pokud je závaží těžší než těžké místo rotoru, fáze se otočí o 180deg a vibrace budou na nějaké nové úrovni. Pokud závaží bude lehčí než těžké místo, dojde ke snížení vibrací a fázový úhel zůstane stejný
- Nejpravděpodobněji bude závaží umístěno někde mezi výše citované možnosti, a výsledné vibrace i fázový úhel se ustálí na nových hodnotách.

Znovu změřené vibrace a fázový úhel jsou vyneseny opět do vektorového grafu. V obr.4.14 jsou původní naměřené hodnoty reprezentovány písmenem O a hodnoty po přidání zkušebního závaží O+T. Spojnice konců těchto vektorů představuje efekt přidání zkušebního závaží, označen písmenem T. Snaha je získat korekční závaží takové, které má stejnou velikost ale opačný směr než původní nevyvaha. Pro dopočítání korekčního závaží je nutné odměřit velikost vektoru T a následně dosazení do vzorce:

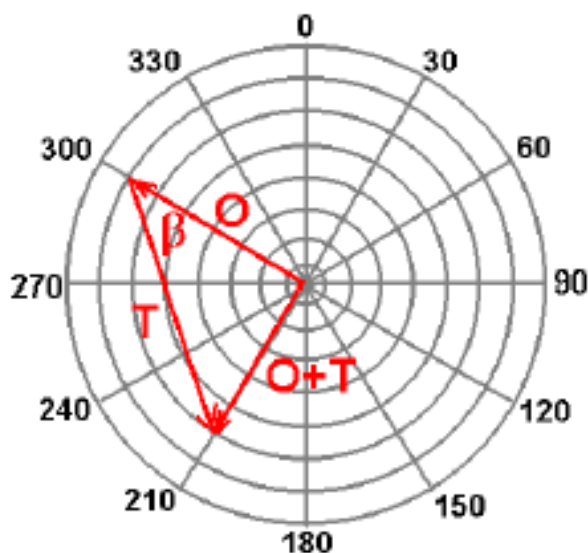
$$m_k = m_z \cdot \left( \frac{O}{T} \right) \quad [\text{kg} \cdot 10^{-3}] \quad (2)$$

$m_k$  – korekční závaží

$m_z$  – zkušební závaží

$O$  – velikost vektoru původních vibrací

$T$  – velikost vektoru spojnice konců naměřených vektorů



**Obr.4.14** Vektorový výpočet pro vyvažování v jedné rovině [1]

Úhel  $\beta$  mezi vektory  $O$  a  $T$  je odměřen z diagramu. Tento úhel reprezentuje umístění korekčního závaží vzhledem k umístění zkušebního závaží. Směr posunutí závaží závisí na použité metodě měření fáze.

### Tříbodová metoda

Měření vibrací provádíme vždy v jednom bodě a záleží, kterou vyvažovací rovinu chceme vyvažovat. Měřicí bod musí být vyznačen tak, aby byla kdykoliv zachována opakovatelnost měření. Na první harmonické odečteme hodnotu amplitudy rychlosti vibrací (samozřejmě za provozu). Na výkrese sestojíme kružnici  $k_0$  o poloměru rovném hodnotě této amplitudy. Někdy je nutné kreslit v měřítku pro lepší rozlišitelnost. Stroj zastavíme a tím je ukončen první běh.

Při zastaveném a zajištěném stroji proti nahodilému zapnutí rozdělíme oběžné kolo na tři části vzájemně posunuté o  $120^\circ$ . Na každé části vyznačíme bod na stejném poloměru a označíme je čísly 1,2,3. Do těchto bodů budou postupně připevňovány pomocné vývažky a při stejných otáčkách budou proměřeny vibrace v měřeném bodě a odečteny hodnoty

amplitud. Po změření těchto amplitud je ukončen druhý, třetí a čtvrtý běh. Hmotnost pomocného vývažku se volí podle empirického vztahu:

$$m_w = \frac{X_v M}{r_w} \quad [\text{kg} \cdot 10^{-3}] \quad (3)$$

$X_v$  - je hodnota amplitudy změřená při prvním běhu v měřeném bodě

$M$  - je hmotnost rotujících částí (oběžné kolo, hřídel, spojka)

$r_w$  - je pol. pomocného vyvážku udávajícího vzdálenost jeho těžiště od osy rotace.

*Z naměřených hodnot se graficky určí příčinkový činitel  $\alpha$ , potřebný pro výpočet hmotnosti  $m_n$  hledaného vývažku obr.4.15, takto:*

- kolem zvoleného počátku O se opíše kružnice  $k_0$  poloměrem rovným  $X_v$ ;
- na kružnici  $k_0$  se vyznačí body 1, 2, 3 odpovídající místům připojování pomocného vývažku W;
- kolem bodu 1 se opíše kružnice  $k_1$  poloměrem  $X_{v1}$ , kolem bodu 2 kružnice  $k_2$  poloměrem  $X_{v2}$  a kolem bodu 3 kružnice  $k_3$  poloměrem  $X_{v3}$ ; všechny tři kružnice by se teoreticky měly protínat v jednom bodě P. Vlivem nelineárních vlastností měřené soustavy a vlivem určitých nepřesností měření se dostanou obvykle tři průsečíky  $P_1, P_2, P_3$ ; jejich spojením vznikne trojúhelník, jehož plocha je určitou mírou nelinearity soustavy, popřípadě nepřesností měření;
- spojnice těžiště  $\Delta P_1 P_2 P_3$  s bodem O je příčinkový činitel  $\alpha$ ; jeho směr určuje tentokrát rovinu nevyváženosti zcela jednoznačně, přičemž průsečík  $\alpha$  s  $k_0$  udává „lehké místo“ L;

Hmotnost  $m_n$  hledaného nevyvážku se určí ze vztahu:

$$m_n = \frac{X_v}{\alpha} m_w \frac{r_w}{r_v} \quad [\text{kg} \cdot 10^{-3}] \quad (4)$$

$X_v$  - je hodnota amplitudy změřená při prvním běhu v měřeném bodě

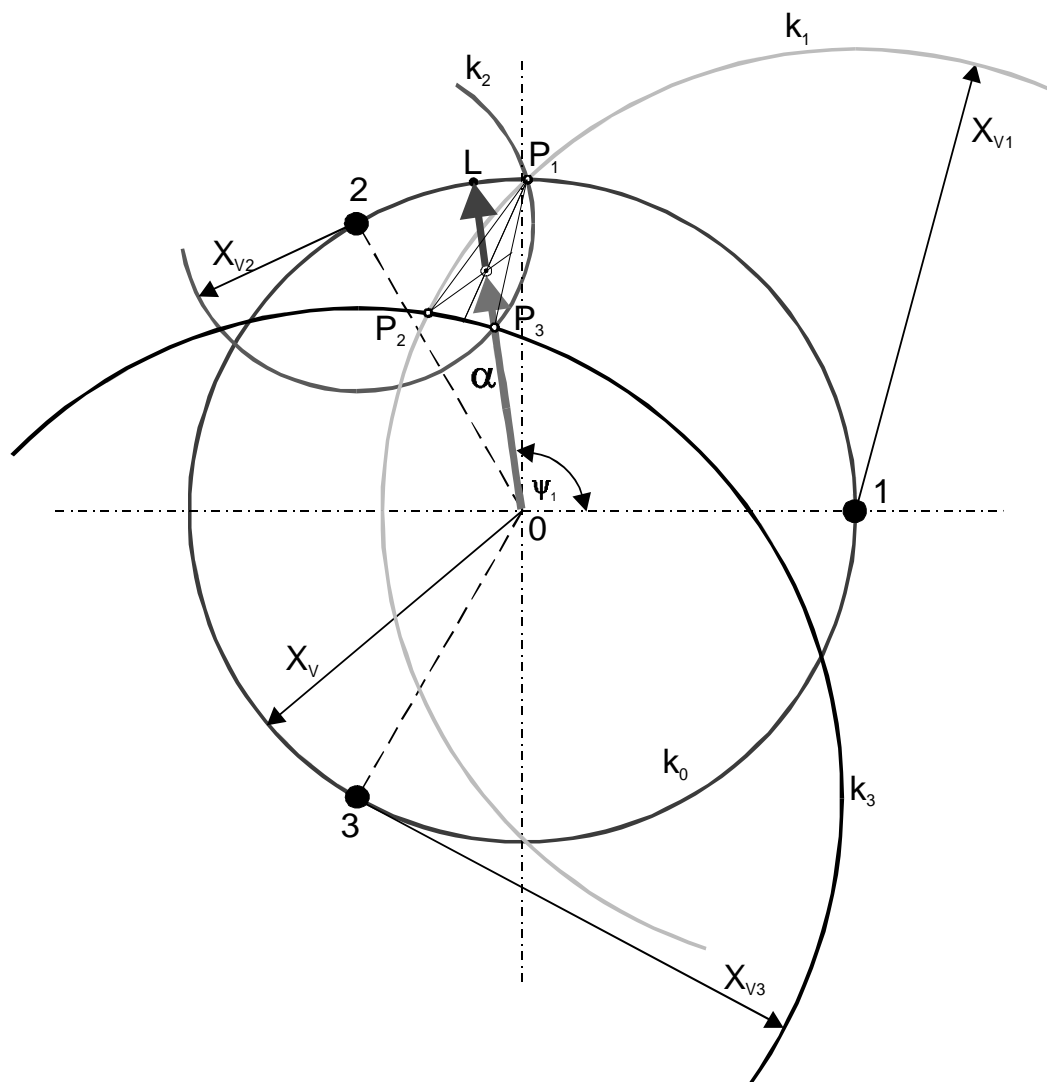
$r_w$  - je pol. pomocného vyvážku udávajícího vzdálenost jeho těžiště od osy rotace

$m_w$  - hmotnost pomocného vývažku

$\alpha$  - příčinkový činitel, graficky zjištěn

$r_v$  - je skutečný poloměr nevyvážku udávající vzdálenost jeho těžiště od osy rotace

Vypočtený vývažek o hmotnosti  $m_n$  se připojí do místa L.



**Obr.4.15** Tříbodová metoda [1]

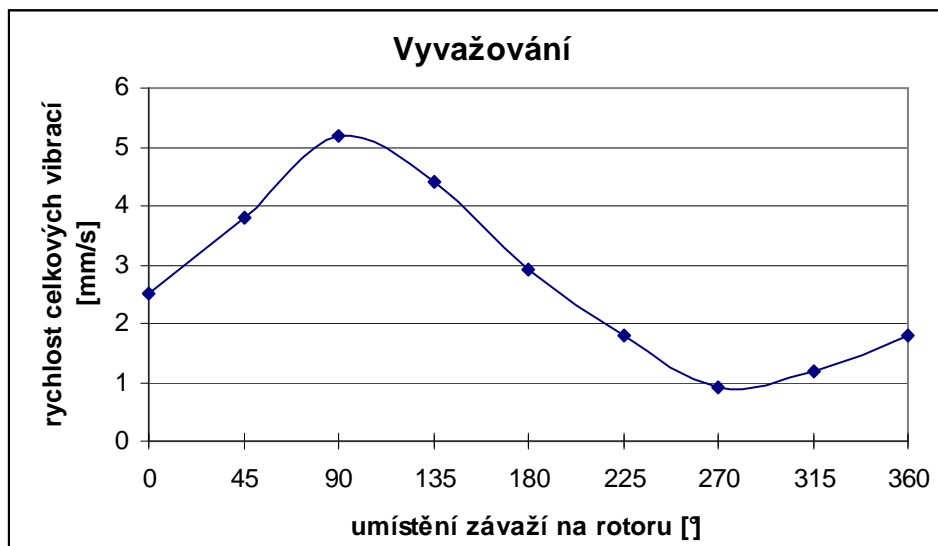
### Metoda putujícího nevyvážku („pokus omyl“)

Nejprve jsou změřeny celkové hodnoty vibrací na jednotlivých ložiskových domech v dostupných směrech a jejich hodnoty uvedeny do tabulky. Je vybrán ložiskový domek s největší mohutností vibrací, na kterém se provádí měření. Dále se rozdělí vyvažovaný kotouč po obvodu na vhodný počet částí. Zvolený nevyvážek se umístí postupně do všech míst rozděleného kotouče.

Všechny naměřené hodnoty jsou vyneseny do grafu.4.1, tím zjistíme, při kterém umístění jsou vibrace nejmenší a do tohoto místa pak umístíme vyvažovací závaží. Jeho hmotnost je rovněž určena pokusně.



Tato metoda je poměrně zdlouhavá a základní nevýhodou je potřeba několikrát zastavovat a rozjíždět vyvažované zařízení. Přesnost této metody také není nikterak dobrá, z důvodu nepřesného umístění a zvolené hmotnosti závaží.



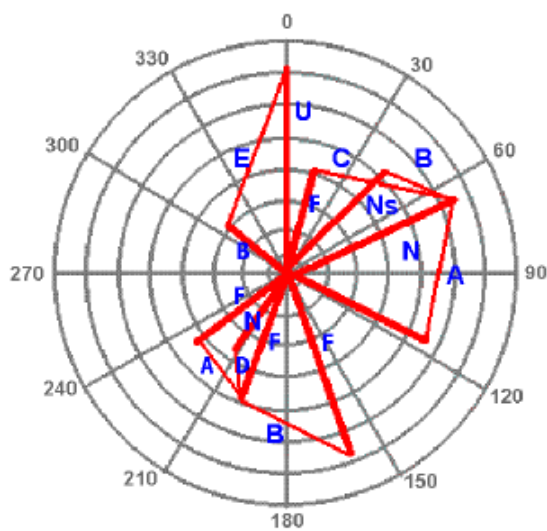
**Graf.4.1** Grafické zobrazení nevyvážky

## 4.2 Vyvažování ve dvou rovinách

Vektorové grafické řešení vyvažování ve dvou rovinách je stejně jako u vyvažování v jedné rovině, založeno na měření amplitudy a fáze otáčkové složky vibrací na ložiskách. Postup vyvažování je následující:

- měření vibrací nevyváženého rotoru na ložiskách A a B, a zaznamenání výsledků měření
- přidání libovolného zkušebního závaží do roviny #1
- měření vibrací na ložiskách A a B, se zaznamenáním výsledků měření
- sejmutí zkušebního závaží v rovině #1 a přidání libovolného zkušebního závaží do roviny #2
- měření vibrací na ložiskách A a B, a zaznamenání výsledků měření

Podobně jak u grafické metody vyvažování v jedné rovině, jsou výsledky vyneseny do grafu na obr.4.16. Samotný diagram i příslušné výpočty jsou však komplexnější než v případě vyvažování v jedné rovině. V dnešní době je zde použito vyvažovacích programů, zjednodušení úkonu.



**Obr.4.16** Vektorový diagram u vyvažování ve dvou rovinách [1]

## **5. Návrh přípravku k vyvažování**

### **5.1 Stanovené požadavky na provoz přípravku**

Přípravek k vyvažování bude sloužit pobočce SKF Ložiska a.s. Ostrava k názornému předvedení příčin a důsledků nesprávného vyvážení rotačních součástí. Bude možné provést demonstraci nevývahy v určitých provozních možnostech tj. změna nevývažku, změna otáček, umístění setrvačníku s nevývažkem.

Stanovené požadavky:

- vhodné rozměry – jednoduchost transportu
- s ohledem na komponenty přiměřená hmotnost
- možnost přednastavení setrvačníku na libovolnou polohu
- použití již vlastněného motoru
- jednořadá kuličková ložiska

### **5.2 Použité komponenty**

#### **Elektromotor**

Použit je elektromotor značky Siemens 1LA7063 4AB10, jeho parametry jsou následující:  $U=400\text{V}$  3f,  $P=0,18\text{kW}$ ,  $n=1350\text{ot/min}$ .

#### **Spojka**

Vzhledem k jednoduchosti a snadné manipulaci je zvolena křížová spojka firmy SKF, označení PHE L050-11MM, PHE L050-12MM, PHE L050NR.

#### **Ložiska**

Zvolena ložiska dle požadavků, tj. jednořadá kuličková SKF 16101, dle průměru hřídele.

#### **Základová deska, profilové podložky, poziční spojky, šrouby a matice**

Tyto části jsou použity od firmy ALUTEC K&K a.s. <http://www.aluteckk.cz/>. Základová deska je profilovaná se slitiny hliníku, výhodou je pevnost a minimální hmotnost.

**Hřídel**

Hřídel byla navržena s ohledem na rozměry ostatních součástí a možné nastavení rozpětí ložiskových domků. Není normalizovaná, v příloze se nachází výrobní výkres.

**Setrvačnick**

Velikost setrvačnicku brána se zřetelem na ostatní součásti a specifikované požadavky firmy SKF. Není normalizován, v příloze se nachází výrobní výkres.

**Ložiskový domek**

Navrhnut dle specifikovaných ložisek, s požadovaným zajištěním v axiálním směru. Brán ohled na hmotnost a připojovací rozměry. Není normalizován, v příloze se nachází výrobní výkres.

**Stavěcí kroužek**

Doplňk k zajištění ložisek. Jeho předností je možnost libovolného nastavení na požadované rozpětí ložiskových domků. Není normalizován, v příloze se nachází výrobní výkres.

**Nevývažek**

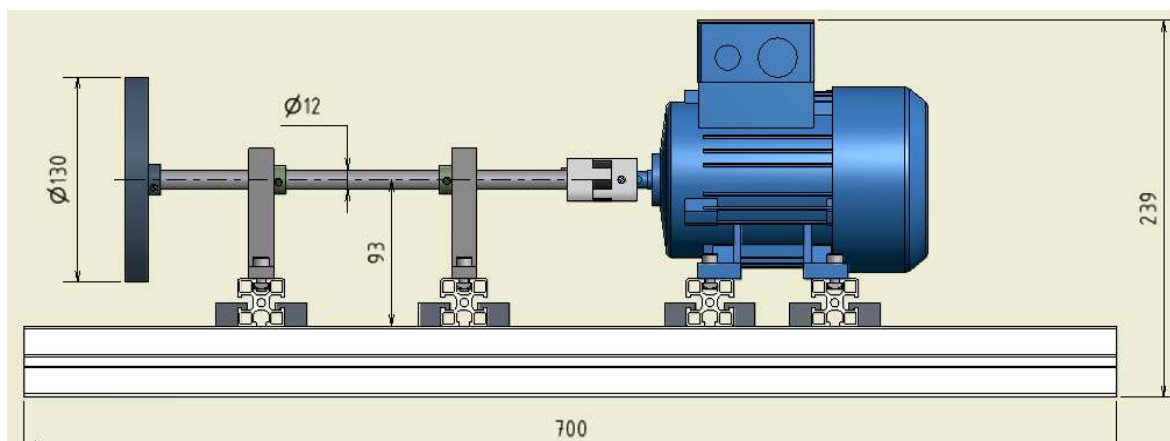
Je zde prezentován libovolným vhodným materiálem, který se dá umístit do vnější části setrvačnicku. Jedním z nejjednodušších možných materiálů je obyčejná plastelína.

**5.3 Možnosti přípravku k vyvažování**

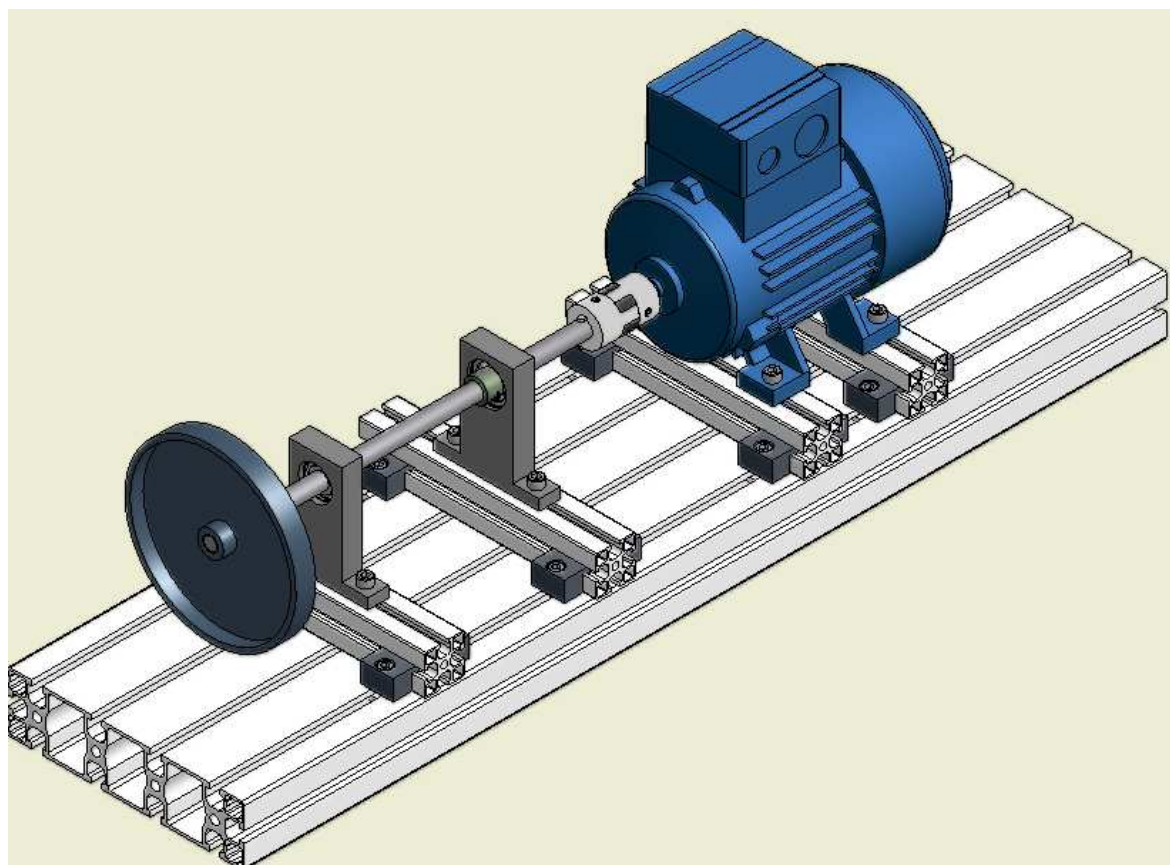
Základní předností přípravku k vyvažování je jeho možnost stavitelnosti. Lze dosáhnout různých simulací provozních stavů a tím i ukázky projevů nevývahy.

Přednastavit jde k simulaci nevývahy převislého konce na libovolném přesahu, v rámci možností přípravku. Dále umístění setrvačnicku s nevývahou mezi samotné ložiskové domky. Nevývaha je zde způsobena umístěním nevývažku libovolné hmotnosti.

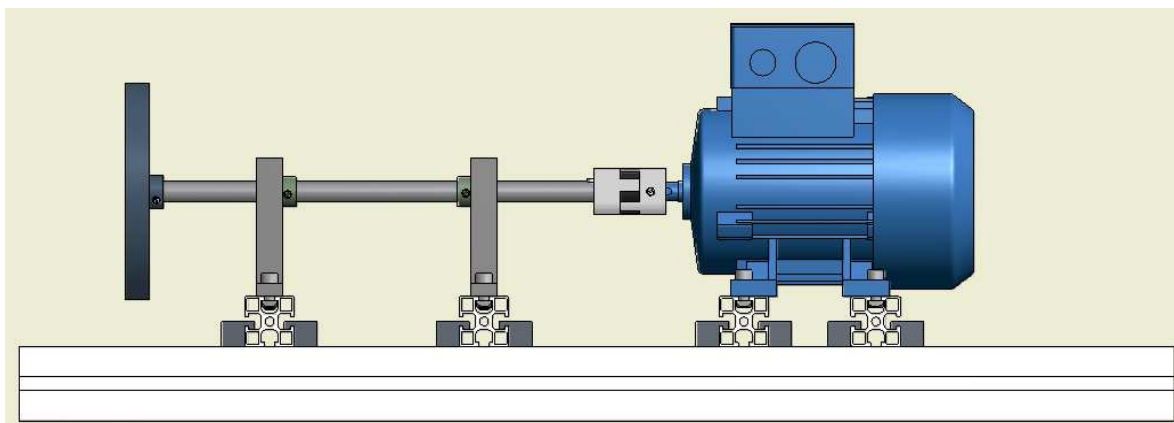
Základní rozměry jsou znázorněny na obr.5.17. Zmiňované způsoby jsou zobrazeny na následujících obrazcích 5.18, 5.19, 5.20.



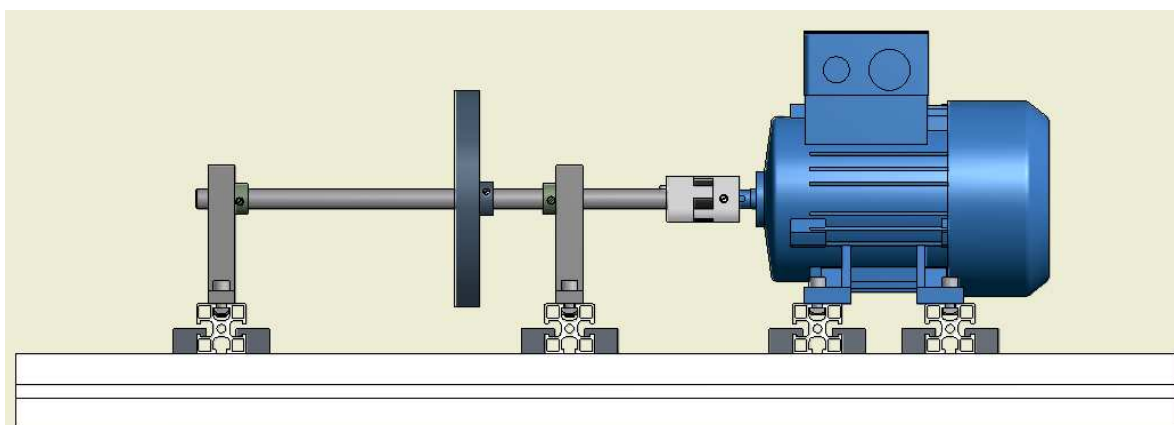
**Obr.5.17** Základní rozměry přípravku – modelováno 3D Autodesk Inventor



**Obr.5.18** Celkový pohled na přípravek k vyvažování - modelováno 3D Autodesk Inventor



**Obr.5.19** Možné přednastavení na převislý konec - modelováno 3D Autodesk  
Inventor



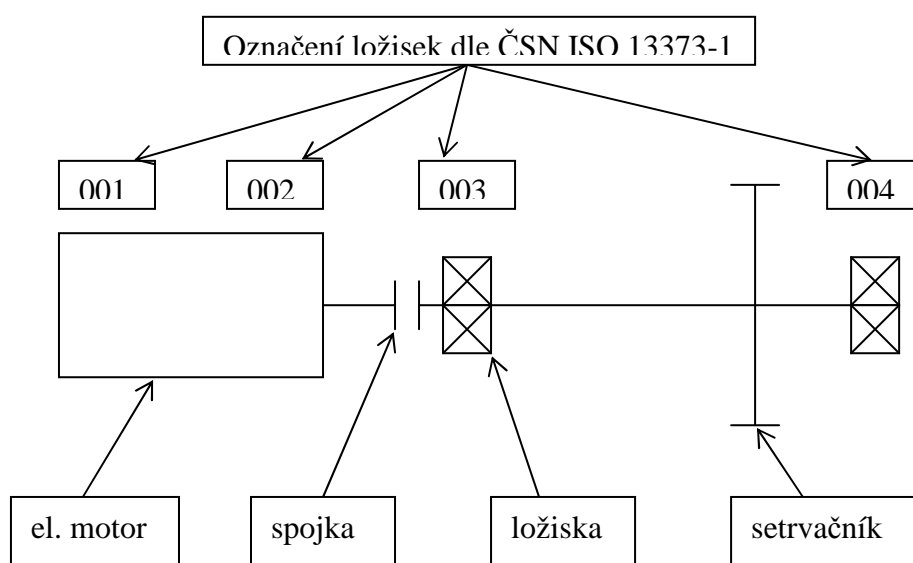
**Obr.5.20** Možné přednastavení na setrvačnick mezi lož. domky - modelováno 3D Autodesk  
Inventor

## 6. Vzorová měření na přípravku

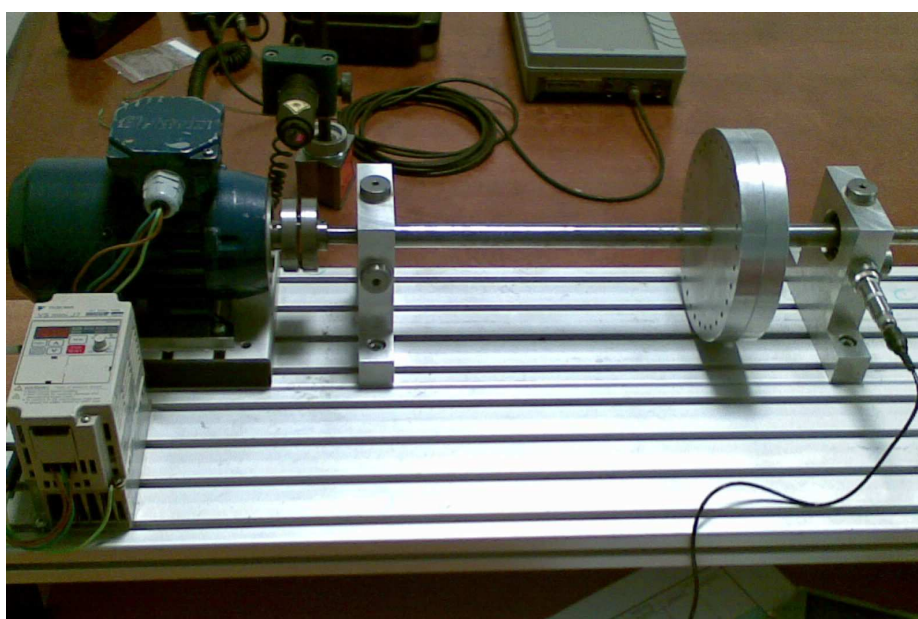
### 6.1 Schéma zkušebního přípravku

Měření je prováděno na zkušním přípravku, který je znázorněn na obrázku 6.21 a 6.22. Označení ložisek je dle ČSN ISO 13373-1. Měření je prováděno na ložiskách 003 a 004 ve směrech horizontálních, vertikálních a axiálních.

Výkon el. motoru je 0,18kW. Otáčky motoru jsou nastaveny pomocí frekvenčního měniče na 2100ot/min tj. 35Hz.



Obr.6.21 Schéma zkušebního přípravku



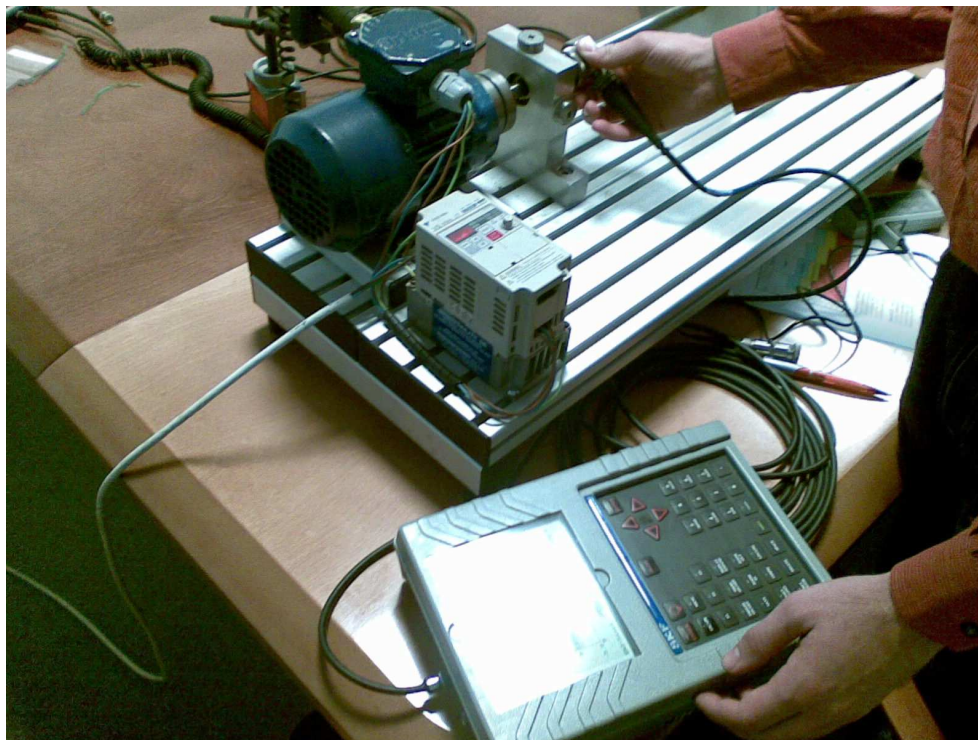
Obr.6.22 Fotografie zkušebního přípravku



## 6.2 Naměřené hodnoty před vyvažováním

### 6.2.1 Použité přístroje

- Vibration Pen Plus – vibrační pero
- Microlog CMVA 60 obr.6.23
- Pocket Laser Tach 20 obr.6.24
- Váha



**Obr.6.23** Použití Micrologu CMVA60



**Obr.6.24** Použitá sada Pocket Laser Tech 20



### 6.2.2 Vyhodnocování vibrací dle ISO ČSN 10816

Hodnocení je prováděno dle normy ISO. Norma dělí rotační stroje do čtyř základních skupin podle jejich příkonu. Stav vyváženosti stroje je jednoznačně určen velikostí efektivní rychlosti měřeného kmitání. Je rozdělen do čtyřech úrovní: dobrý, uspokojivý, neuspokojivý a nepřijatelný. Typické hranice pásem jsou zobrazeny na obr.6.25.

	Malé stroje	Střední stroje	Velké stroje	
mm/s	Skupina I	Skupina II	Skupina III	Skupina IV
0,28		<b>Dobry</b>		
0,45				
0,71				
1,12		<b>Uspokojivy</b>		
1,8				
2,8		<b>Neuspokojivy</b>		
4,5				
7,1		<b>Neprijatelný</b>		
11,2				
18				
28				
45				
71				

Obr.6.25 Stanovené hraniční pásma [7]

#### Popis jednotlivých strojových skupin

*Skupina I* – jednotlivé části a podskupiny strojů integrované do celkové soustavy, provozující v normálních provozních podmínkách. Průmyslové elektrické motory do 15kW jsou typickým příkladem této skupiny.

*Skupina II* – středně velké stroje. Typicky elektrické motory od 15 do 75kW bez speciálních základů, nehybně uložené stroje, nebo stroje se speciálními základy do 300kW.

*Skupina III* – velké hnací stroje nebo jiné velké stroje s rotační hmotou, které jsou namontovány na tuhých a masivních základech a jsou relativně tuhé ve směru měření vibrací.

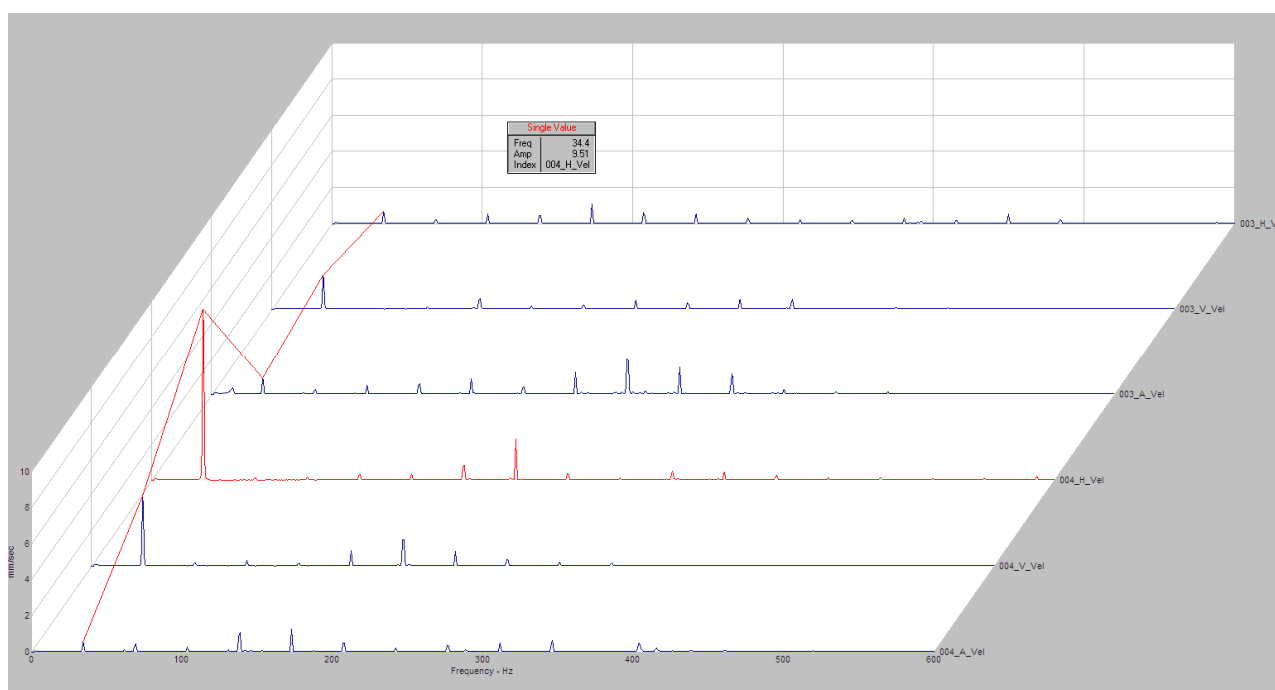
*Skupina IV* – velké hnací stroje a jiné velké stroje s rotační hmotou, namontované na základech, které jsou relativně pružné ve směru měření vibrací.

### 6.2.3 Naměřené hodnoty vibrací

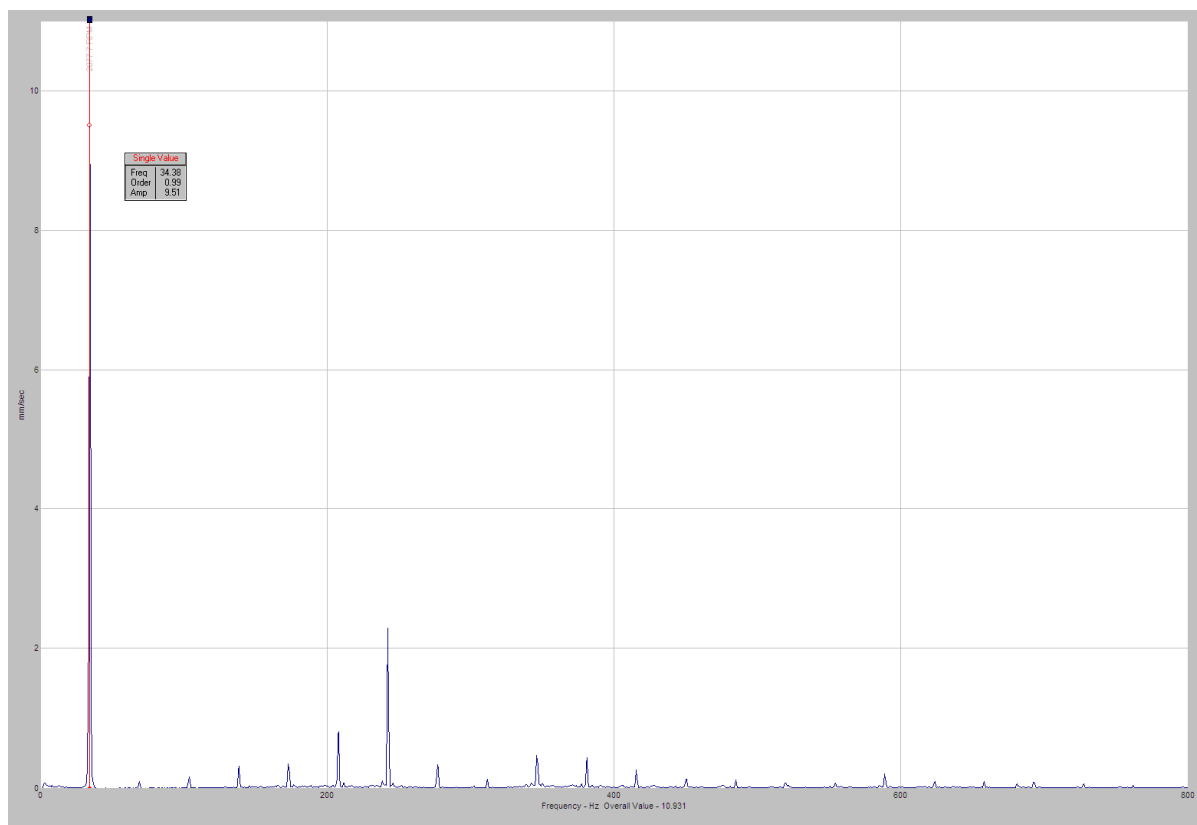
Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 6.1. Dále je na obr.6.26 kaskáda spekter vibrací před vyvážením, na které je patrná nevývaha. Z naměřených hodnot je očividné, že se dále bude měřit jen na ložisku 004 kde je hodnota v horizontálním a také ve vertikálním směru dle normy ČSN ISO 10816 – NEPŘÍPUSTNÁ viz.6.2.2. FFT spektrum ložiska 004 v horizontálním směru je na obr. 6.27 opět patrná nevývaha – vysoká hodnota první otáčkové frekvence.

**Tab.6.1** Naměřené celkové hodnoty efektivní rychlosti vibrací

Rychlost	$v_{ef}$ [mm/s]	
Místo/směr	003	004
Horizontálně	1,956	<b>10,93</b>
Vertikálně	2,417	<b>4,853</b>
Axiálně	3,69	2,318



**Obr.6.26** Kaskáda spekter před vyvážením



Obr.6.27 FFT spektrum ložiska 004

### 6.3 Vyvažování metodou putujícího nevyvažku

Teorie je rozepsána v kapitole 4.1 – vyvažování metodou putujícího nevyvažku.

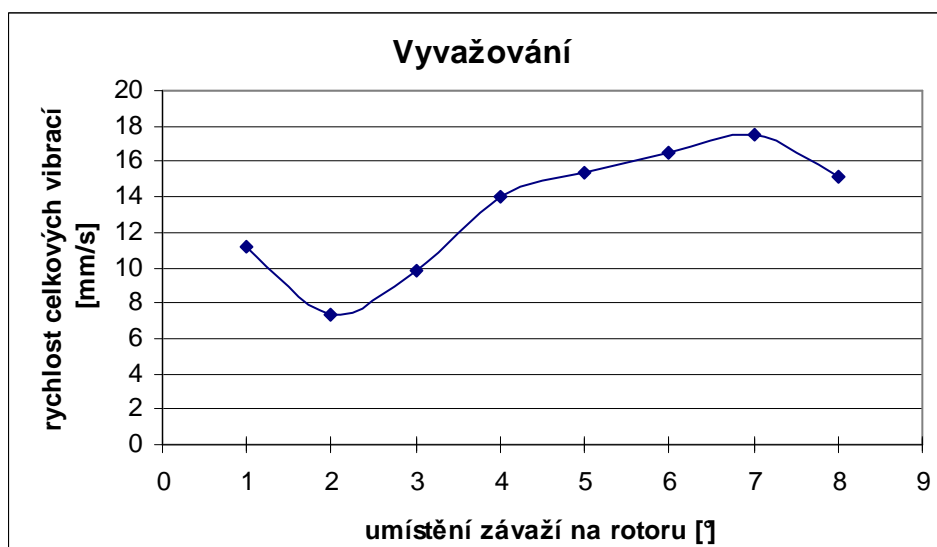
#### Provedený postup vyvažování:

- na základě předchozího měření bylo vybráno místo a směr měření pro vyvažování:  
004 Horizontálně
- zvolena velikost pokusného závaží  $m_z=2,3g$
- postupně bylo přemisťováno zvolené pokusné závaží do míst na obvodu kotouče, hodnoty zapsány v tab.6.2

**Tab.6.2** Naměřené hodnoty celkové efektivní rychlosti vibrací

Rychlost	$v_{ef}$ [mm/s]							
Místo	1	2	3	4	5	6	7	8
004 H	11,2	7,4	9,8	14	15,4	16,5	17,5	15,1

- zkonstruován graf 6.2



**Graf 6.2** Závislost celkové efektivní rychlosti vibrací na poloze na obvodu

- stanoveny nejmenší vibrace dle grafu – místo 2
- v místě 2 měněno pokusné závaží a opakována měření viz. tab.6.3

**Tab.6.3** Naměřené hodnoty s měněným závažím

Hmotnost (g)	2,3	3,8	4,2	<b>4,4</b>	5
$v_{ef}$ [mm/s]	7,4	3,5	3,3	<b>3,1</b>	4,2

- závěrečné měření  $v_{ef}$  ve všech měřících místech hodnoty zaznamenány v tab.6.4

**Tab.6.4** Naměřené závěrečné hodnoty

Rychlost	$v_{ef}$ [mm/s]	
	003	004
Místo/směr	003	004
Horizontálně	2,4	<b>3,1</b>
Vertikálně	2,7	2,1
Axiálně	1,3	2,6

- Závěr – zkušební přípravek se dle hodnocení ČSN ISO 10816 nachází v NEUSPOKOJIVÉM stavu.

## 6.4 Vyvažování tříbodovou (tříkružnicovou) metodou

Teorie je rozepsána v kapitole 4.1 – vyvažování tříbodovou metodou.

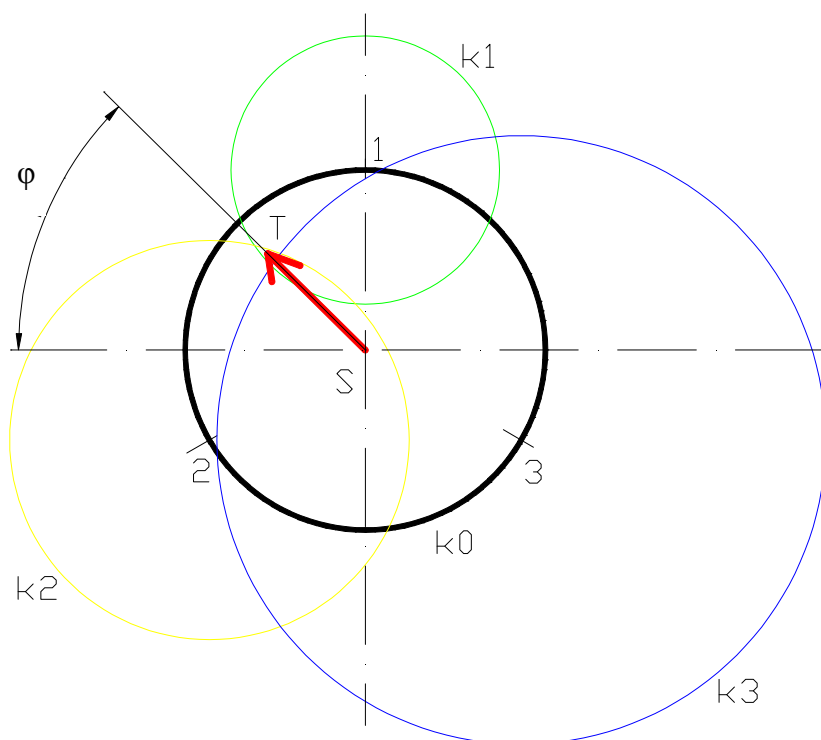
### Provedený postup vyvažování:

- dle naměřených hodnot zvoleno místo a směr 004 Horizontálně.
- nakreslena kružnice s označením 0 a poloměru, který odpovídá velikosti vibrací v nultém měření tj.  $r = 55\text{mm}$
- zvolené zkušební závaží  $m_z = 3,6\text{g}$
- provedena tři měření se zkušebním závažím umístěným po obvodu kotouče tab.6.5

**Tab.6.5** naměřené hodnoty se zkušebním závažím

Číslo měření	1	2	3
$v_{ef} [\text{mm/s}]$	8,2	12,3	18,6

- zkonstruování geometrických úkonů viz. obr.6.28



**Obr.6.28** Konstrukce tříkružnicové metody

- výpočet správného závaží dle vztahu z kap.4.1 (4) tříbodová metoda  $m_n = 4,21\text{g}$
- odměření úhlu  $\varphi$ , jenž udává polohu nevyvážku k poloze zkušebního závaží

- umístění vypočteného závaží do patřičného místa a provedeno kontrolní měření ve všech měřicích bodech. Hodnoty v tab.6.6

**Tab.6.6** Naměřené závěrečné hodnoty

Rychlost	$v_{ef}$ [mm/s]	
Místo/směr	003	004
Horizontálně	2,3	<b>2,9</b>
Vertikálně	2,6	2,0
Axiálně	1,6	2,4

- Závěr – zkušební přípravek se dle hodnocení ČSN ISO 10816 nachází v NEUSPOKOJIVÉM stavu.

## 6.5 Vyvažování vektorovou metodou

K vyvažování vektorovou metodou bylo použito vestavěného programu Micrologu CMVA60, který pracuje s danou metodou a je častěji používám. K měření fáze byla připojena sada Pocely Laser Tach 20. Teorie je rozepsána v kapitole 4.1 – vyvažování vektorovou metodou.

### Provedený postup vyvažování:

- nejprve proveden nultý chod dle požadavků vyvažovacího programu tab.6.7.

$v_0$ [mm/s]	11,34
$\varphi_0$ [°]	101,2
Speed [Hz]	34,62

**Tab.6.7** Naměřené hodnoty nultého chodu

- zvolení zkušebního závaží, je zde i možnost výpočtu zkušebního závaží za pomoci vyvažovacího programu, který ale požaduje informace jenž neznáme, zvoleno  $m_z = 2,2g$ .

- proveden zkušební chod se závažím umístěným ve zvoleném bodě. Vzhledem k tomu, že první zkušební chod nesplňoval podmínku změny amplitudy nebo fáze alespoň o 30% je proveden druhý zkušební chod, naměřené hodnoty tab.6.8.

**Tab.6.8** Naměřené hodnoty zkušebního chodu

	<i>Zk. Chod 1</i>	<i>Zk. Chod 2</i>
$v_1$ [mm/s]	13,7	16,1
$\varphi_1$ [°]	125,6	91,8

- následuje výpočet pomocí vyvažovacího programu, vypočetl  $m_n = 4,1g$  a  $\varphi = 29^\circ$ .
- Umístění vypočteného závaží do místa určeného programem a provedeno kontrolní měření ve všech měřících bodech, tab.6.9.

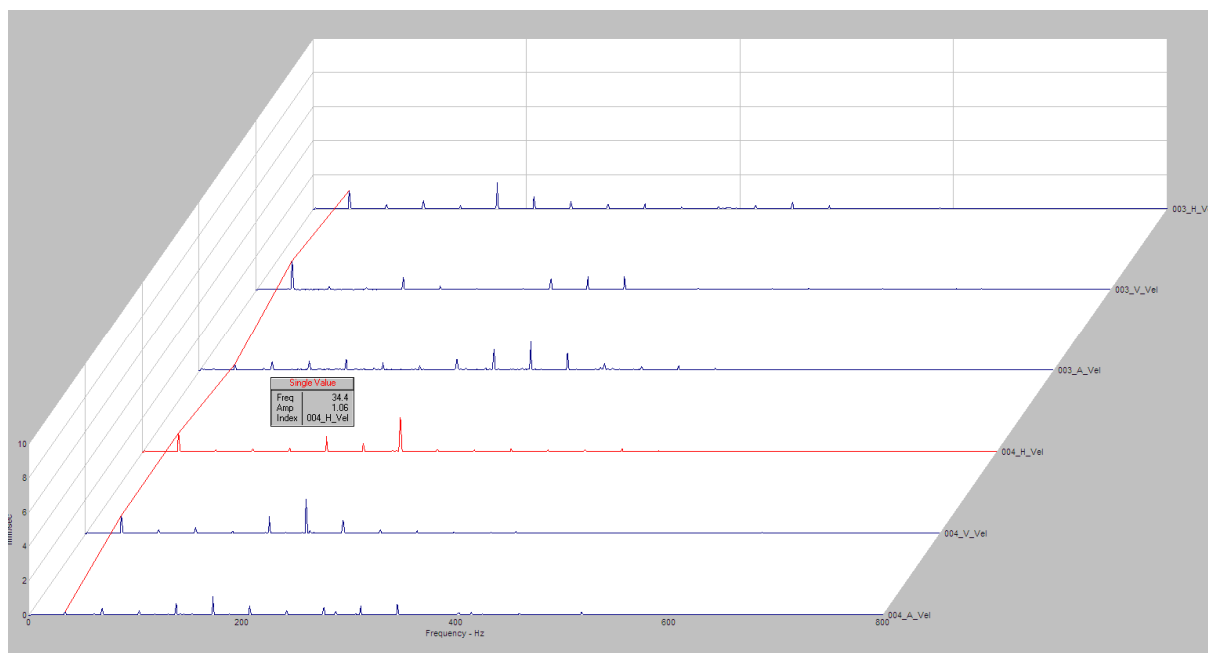
**Tab.6.9** Naměřené závěrečné hodnoty

Rychlost	$v_{ef}$ [mm/s]	
Místo/směr	003	004
Horizontálně	2,5	<b>2,7</b>
Vertikálně	2,8	2,7
Axiálně	1,8	1,9

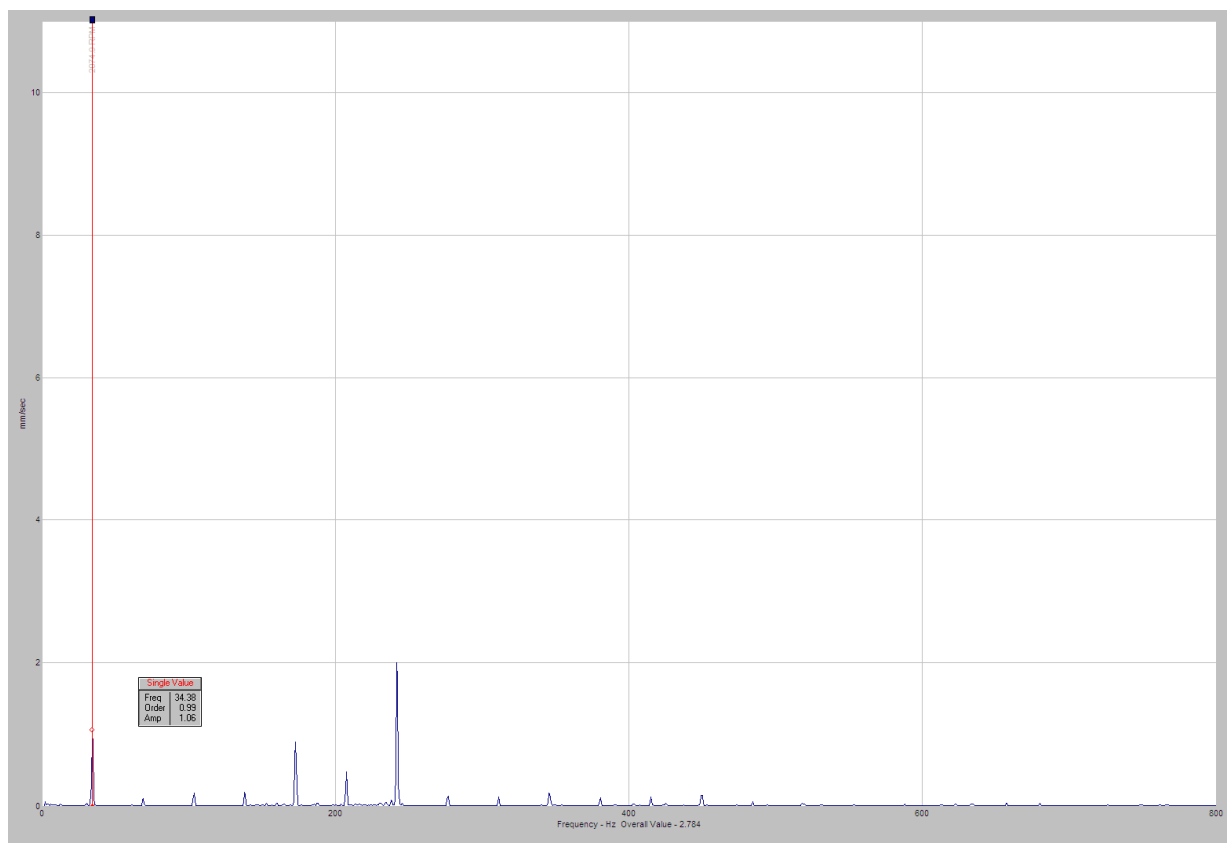
- Závěr – zkušební přípravek se dle hodnocení ČSN ISO 10816 nachází v NEUSPOKOJIVÉM stavu. Je dosaženo nejlepších hodnot v rámci zkoušených metod.

### 6.5.1 Kaskáda spekter a FFT spektrum vibrací po vyvážení

Vzhledem k tomu, že metoda vektorová dává nejpřesnější výsledky je zde ukázána kaskáda spekter po vyvážení touto metodou obr.6.29 a spektrum vibrací ložiska 004 v horizontálním směru obr.6.30.



**Obr.6.29** Kaskáda spekter po vyvážení vektorovou metodou



**Obr.6.30** FFT spektrum ložiska 004 po vyvážení



## 7. Závěrečné shrnutí a doporučení

V této práci jsem se zabýval provozním vyvažováním a problematikou související s aplikacemi vyvažovacích metod. Nevývaha je jedním z největších problémů rotačních součástí, proto jsem zde také navrhl přípravek, jenž bude sloužit k názornému předvedení nevyvážky a možnosti použití vyvažovacích metod.

Na začátek byla objasněna problematika vyvažování s jejími možnými důsledky, možnosti její detekce a následné odstranění vhodnou metodou. Při ověřování vyvažovacích metod byla prokázána nevhodnost některých metod k určitým vyvažovacím úkonům. Příkladem může být jednoduchá metoda putujícího nevyvážku jenž potřebuje ke své aplikaci několikrát zastavení a rozběhnutí stroje, což je nevhodné u provozního vyvažování rotačních strojů. Metoda třibodová nevyžaduje tolik rozběhů stroje, ale nedosahuje se s ní takové přesnosti jako u metody vektorové, která potřebuje ještě méně rozběhů a zastavení stroje. Vektorová metoda je nejpřesnější a v dnešní době nejvíce využívanou. Další výhoda vektorové metody spočívá ve využití vestavěného programu u některých Micrologů.

Využití metod závisí také na možnosti provozního vyvažování. Někdy není možné uplatnit přesnou metodu vektorovou z důvodu nemožnosti umístění měření fáze, proto zde nachází uplatnění metoda třibodová, která nepožaduje měření fáze. V případě, že se nepodaří vyvažovaný stroj umístit do stavu dobrý dle normy, provede se opětovné vyvážení, dovyvážení, případně se hledá příčina zcela někde jinde. Tento případ nastal i zde u prováděného vzorového měření, kde příčina byla v dostatečně neutaženém šroubu. Tento projev lze vidět v FFT diagramech.

Udržení rotačního stroje ve vyváženém stavu je k zajištění provozní spolehlivosti nezbytnou součástí.

## 8. Seznam použitých zdrojů

- [1] HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost – II. Vibrodiagnostika*. 1. Vyd. VŠB – TU Ostrava 2004. 178 s., ISBN 80–248–0650–9
- [2] MM průmyslové spektrum., [online]. [cit 2009-4-10]. 2008/6. číslo článku 080633., strana 60.: Dostupný z WWW: < <http://www.mmspektrum.com/clanek/energeticka-ucinnost-snizuje-celkove-provozni-naklady>>
- [3] VOŠTOVÁ, V. - HELEBRANT, F. – JEŘÁBEK, K.: *Provoz a údržba strojů část II údržba strojů*. 1. Vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT. 2002 - 124 s., ISBN 80-01-02531-4
- [4] PRVNÍ BRNĚNSKÁ STROJÍRNA: *Preventivní údržba strojů: základy, metody a přístroje pro posuzování, diagnostiku a sledování strojů a pro údržbu podle jejich skutečného stavu*. 1. Vyd. Praha: SNTL. 1989 - 346 s.,: SIP 05355
- [5] FRYML, B. – BORŮVKA, V.: *Vyvažování rotačních strojů v technické praxi*. 1. Vyd. Praha: SNTL. 1962 – 240 s., TČ. L13-B2-4-I/2504
- [6] SKF Condition Monitoring, San Diego. *Průvodce vibrační diagnostikou I*. 1995. 61 s., CM 5003-CZ
- [7] SKF Condition Monitoring.: [online]. [cit.2009-4-10]. Dostupný z WWW: < <http://www.skf.com/files/260849.pdf>>
- [8] SKF Condition Monitoring.: [online]. [cit.2009-4-10]. Dostupný z WWW: < <http://www.skf.com/files/260855.pdf>>
- [9] SKF Condition Monitoring.: [online]. [cit.2009-4-11]. Dostupný z WWW: < <http://www.skf.com/files/260863.pdf>>
- [10] SKF Condition Monitoring.: [online]. [cit.2009-4-11]. Dostupný z WWW: < <http://www.skf.com/files/260860.pdf>>
- [11] HRABEC, L. – HELEBRANT, F. – MAZALOVÁ, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost – III. Ustavování strojů*. 1.Vyd. VŠB – TU Ostrava 2007. 92 s., ISBN 978–80–248–1449–0

## 9. Seznam příloh

1. Výkres sestavy, č.dokumentu pripravek-sestava
2. Výrobní výkres hřídele, č.dokumentu pripravek-01
3. Výrobní výkres ložiskového domku, č.dokumentu pripravek-03
4. Výrobní výkres setrvačníku, č.dokumentu pripravek-02
5. Výrobní výkres pojištění ložiska, č.dokumentu pripravek-04